

---

# Vers la modélisation du comportement thermohydrique réel d'une paroi en béton de chanvre

**Aït Ouméziane Yacine**

*Université européenne de Bretagne, INSA Rennes, LGCGM Laboratoire de Génie Civil et de Génie Mécanique, 20 Avenue des Buttes de Coësmes CS 14315, F – 35043 Rennes Cedex, France*

*yacine.ait-oumeziane@univ-rennes1.fr*

Prix Jeunes Chercheurs « René Houpert »

*RÉSUMÉ. Le béton de chanvre constitue une solution constructive conforme aux objectifs en matière de développement durable. Ce type de matériaux est caractérisé par un comportement thermohydrique complexe et hystérétique. La modélisation d'un tel comportement permet de comparer les réponses numériques et expérimentales obtenues en termes de transfert thermique et hydrique au sein d'une paroi. Différentes conditions de transfert sont étudiées (gradient thermique, hydrique, couplés). Les résultats montrent que le caractère capacitif hydrique est thermodépendant.*

*ABSTRACT. The use of hemp concrete, an environmentally friendly material, participates in a process of sustainable development in the housing field. This kind of material is characterized by a complex and hysteretic hygrothermal behavior. The modelling of such a behavior allows comparing numerical and experimental results in terms of thermal and hydric transfers through a wall. Different transfer conditions are analyzed (thermal, hydric, mixed gradients). The results show a thermal dependence of the hydric capacity.*

*MOTS-CLÉS : béton de chanvre, modélisation, hystérésis, transferts thermo hydriques, enduit*

*KEY WORDS: hemp concrete, modeling, hysteresis, hygrothermal transfers, coating*

---

## 1. Contexte général

Un des objectifs fixé à l'issue du Grenelle de l'environnement est le recours à 10% de matériaux bio-sourcés dans le bâtiment, hors bois-d'œuvre, d'ici 2020. A ce titre, les constructions à faible impact environnemental réalisées à partir de matériaux innovants comme le béton de chanvre connaissent actuellement un véritable essor. Ce type de matériaux à structure poreuse génère une qualité de confort ressentie par les occupants d'une habitation notable. Dans le cadre d'un projet collaboratif associant laboratoires et partenaires industriels, une étude est menée afin de comprendre et caractériser le comportement hydrique réel du béton de chanvre d'un point de vue expérimental et numérique. Le travail présenté dans cet article correspond à la modélisation numérique du comportement thermohydrique d'une paroi en béton de chanvre. Ce matériau, complexe, est caractérisé par des courbes de sorption et de désorption présentant une forte hystérésis. Il existe dans la littérature de nombreux modèles couplés de transferts de chaleur, d'air et de masse appliqués à des matériaux poreux ([TAR 2010], ...) pour lesquels sont parfois intégrés des modèles d'hystérésis ([VAN 2010], ...). Bien que conscients de la présence du phénomène d'hystérésis, les études numériques récentes sur le béton de chanvre ne le prennent pas en compte ([EVR 2008], [SAM 2008], ...). Outre l'intégration d'un modèle d'hystérésis au modèle complet de transferts thermohydriques, l'originalité de ce travail repose sur la prise en considération de l'histoire hydrique du matériau et la mise en évidence de l'influence de la température sur le comportement hydrique réel du matériau.

## 2. Modélisation

Un modèle monodimensionnel multicouche basé sur la conservation des équations d'air, de masse et chaleur est développé. Il s'appuie sur la modélisation mathématique de Kunzel [KUN 1995] :

$$\frac{dw}{d\phi} \frac{\partial \phi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \delta_p p_{sat} \frac{\partial \phi}{\partial x} + \delta_p \phi \frac{dp_{sat}}{dT} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( K_l \rho_w R_{H_2O} \frac{T}{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial x} + K_l \rho_w R_{H_2O} \ln(\phi) \frac{\partial T}{\partial x} \right) - \delta_{air} \frac{0.622}{p_{atm}} \frac{\Delta P}{e} \left( p_{sat} \frac{\partial \phi}{\partial x} + \phi \frac{dp_{sat}}{dT} \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad [1]$$

$$\rho_0 C^* \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} - (C_{pv} T + L_v) g_v - (C_{pl} T) g_l - (C_{pa} T) g_a \right) \quad [2]$$

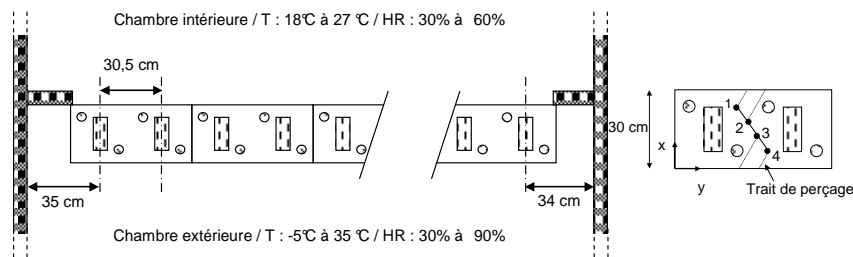
où  $w$  désigne la teneur en eau,  $\phi$  l'humidité relative,  $T$  la température,  $P$  la pression totale,  $\delta_p$  la perméabilité à la vapeur du matériau,  $p_{sat}$  la pression de vapeur saturante,  $K_l$  la conductivité liquide du matériau,  $\rho_w$  la masse volumique de l'eau,  $\delta_{air}$  la perméabilité à l'air du matériau,  $e$  l'épaisseur de la paroi,  $R_{H_2O}$  la constante de gaz parfait de la vapeur d'eau,  $\rho_0$  la masse volumique du matériau sec,  $C^*$  la capacité thermique massique équivalente,  $\lambda$  la conductivité thermique du matériau humide,  $C_{pv}$ ,  $C_{pl}$  et  $C_{pa}$  les capacités thermiques massiques respectivement de la vapeur d'eau, de l'eau liquide et de l'air,  $L_v$  la chaleur latente de changement de phase et  $g_v$ ,  $g_l$  et  $g_a$  les densités de flux respectivement vapeur, liquide et d'air.

Le système d'équations différentielles instationnaires fortement couplées issu de cette modélisation est implémenté sous Matlab par une méthode de différences finies. Le modèle ainsi développé est validé [AIT 2011] par confrontation avec les modèles numériques issus d'un benchmark international HAMSTAD WP2 [HAG 2004]. Cette validation a mis en évidence la capacité du modèle à décrire les transferts aux travers de nombreuses configurations (multicouche, pluie, circulation d'air...) typiques du génie civil.

### 3. Dispositif expérimental et propriétés du matériau

#### 3.1. Description de la paroi, métrologie et mise en place de la modélisation

Dans le cadre d'un projet mené au sein du laboratoire, une paroi réalisée par la société EASY CHANVRE, composée de 31 blocs de béton de chanvre de 30 cm de large et d'éléments d'ossature en bois, est placée dans une chambre biclimatique capable de reproduire des conditions typiques de climats intérieurs et extérieurs.



**Figure 1.** Mur et chambre climatique (à gauche) et positions des capteurs (à droite)

Des capteurs d'humidité relative (Sensirions) et des thermocouples ont été mis en place au sein de la paroi (à respectivement 22 cm, 18 cm, 12 cm et 8 cm de la surface intérieure), sur les surfaces et dans les ambiances. Les orifices créés par perçage pour mettre en place les capteurs puis comblés avec du mortier chanvre/chaux sont choisis pour limiter la perturbation des transferts de masse et de chaleur induite par leur présence. Les blocs étudiés dans cette étude sont instrumentés dans leur partie centrale où l'influence des réservations et orifices n'est pas prise en compte dans la modélisation 1D. Les coefficients d'échange thermique intérieur et extérieur sont déterminés à partir de l'hypothèse de plaque plane verticale permettant de déterminer le nombre de Nusselt en convection naturelle. En outre, les coefficients d'échange massique sont déduits de la formule de Lewis.

#### 3.2. Propriétés du béton de chanvre

Les propriétés du béton de chanvre sont obtenues à partir d'une campagne expérimentale menée au laboratoire. Les dispositifs expérimentaux sont décrits en détails dans [COL 2004]. La masse volumique sèche vaut  $\rho_0 = 420 \text{ kg.m}^{-3}$  et la chaleur spécifique  $C_0 = 1000 \text{ J.kg}^{-1}$ . La conductivité thermique s'exprime :

$$\lambda(w) = \lambda_s + (\lambda_0 - \lambda_s) \frac{w_{sat} - w}{w_{sat}} \quad [3]$$

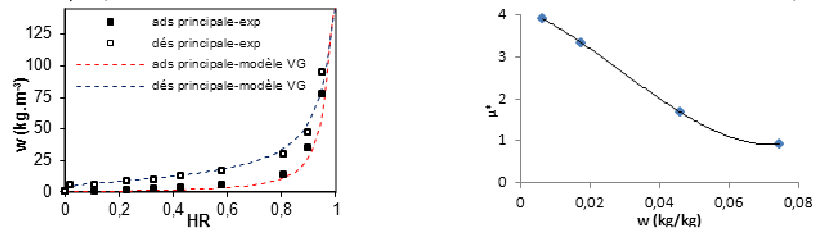
où  $\lambda_s$  est la conductivité du matériau aux fortes humidités évaluée à 0,15 W/m.K et la conductivité  $\lambda_0$  du matériau à l'état sec évaluée à 0,11 W/m.K.

En conditions sèches à 23°C, la perméabilité à la vapeur du matériau  $\delta_{pa}/\mu$  se déduit du facteur de résistance à la vapeur d'eau du matériau, admis constant à  $\mu = 3,91$  et de la perméabilité à la vapeur de l'air  $\delta_{pa}$ . La conductivité liquide se déduit de la formule de Kunzel [KUN 1995] :

$$K_l = \frac{M_w \phi}{\rho_w RT} p_{sat} \delta_{pa} \left( \frac{1}{\mu^*(w)} - \frac{1}{\mu} \right) \quad [4]$$

où  $\mu$  le facteur de résistance de résistance à la diffusion de la vapeur à l'état « sec » et  $\mu^*$  un facteur de résistance « fictif » de résistance à la diffusion aux fortes humidités.  $\mu^*$  prend la forme d'un polynôme d'ordre 3 (figure 2 à droite) et s'écrit :

$$\mu^*(w) = \delta_{pa} \left/ \left( -9,8183.10^{-8} \left( \frac{w}{\rho_0} \right)^3 + 3,8703.10^{-8} \left( \frac{w}{\rho_0} \right)^2 - 1,1328.10^{-10} \left( \frac{w}{\rho_0} \right) + 4,9234.10^{-11} \right) \right. \quad [5]$$



**Figure 2.** Isothermes de sorption à 23°C / résistance de diffusion à la vapeur  $\mu^*$

Le modèle de Van Genuchten [VAN 1980] est utilisé pour modéliser les courbes d'adsorption et de désorption principales (figure 2 à gauche) :

$$w = w_{sat} \left( 1 + \left| \alpha_j \frac{RT_{ref}}{M_w g} \ln(\phi) \right|^{\eta_j} \right)^{\frac{1}{\eta_j} - 1}, j = ads \text{ ou } des \quad [6]$$

où  $w_{sat}$  représente la teneur en eau à saturation et les indices  $\alpha_j$  et  $\eta_j$  sont des paramètres déterminés pour les courbes principales d'adsorption et de désorption à partir des valeurs expérimentales et prennent pour valeur  $\alpha_{ads} = 0,0024$ ,  $\alpha_{des} = 0,0026$ ,  $\eta_{ads} = 2,3$  et  $\eta_{des} = 1,694$ .

### 3.3. Prise en compte du phénomène d'hystérésis

A 23°C, les courbes d'adsorption et de désorption principales peuvent être considérées comme des « limites » physiques à l'évolution de la teneur en eau mais ne décrivent pas le comportement hydrique réel du matériau in situ. Une campagne expérimentale est menée au laboratoire sur la détermination de courbes intermédiaires de sorption et de désorption pour mesurer l'impact du phénomène d'hystérésis. Une courbe primaire est obtenue par désorption à partir de la courbe d'adsorption principale de 81% à 43%. Parallèlement, un effort est porté sur la modélisation numérique du phénomène. Dans cette étude, le modèle de Huang

[HUA 2005] basée sur un modèle mathématique de type Kool & Parker est retenu (cf. [AIT 2012]). Conformément au formalisme de Huang, la  $i^{\text{ème}}$  courbe intermédiaire s'écrit :

$$w(\varphi) = w_r(i) + (w_s(i) - w_r(i)) \left( 1 + \left| \alpha \frac{RT_{ref}}{M_w g} \ln(\varphi) \right|^\eta \right)^{\frac{1}{\eta} - 1} \quad [7]$$

où les indices  $\alpha$  et  $\eta$  sont les paramètres issus des courbes d'adsorption et de désorption principales et  $w_r(i)$  et  $w_s(i)$  représentent respectivement les teneurs en eau résiduelle et de saturation de la  $i^{\text{ème}}$  courbe intermédiaire. Le stockage numérique des points d'inversion successifs permet de passer d'une courbe intermédiaire d'adsorption à une courbe intermédiaire de désorption. La comparaison des capacités de stockage expérimentale et théorique est présentée dans le tableau 1.

$\Delta HR$	Capacité de stockage expérimentale $dw/d\varphi _{exp}$		Capacité de stockage modèle $dw/d\varphi _{mod}$	
	Adsorption principale	1 <sup>ère</sup> désorption	Adsorption principale	1 <sup>ère</sup> désorption
81-43%	30,8	19,7	25	20,2

**Tableau 1.** Capacités de stockage expérimentale et théoriques linéarisées

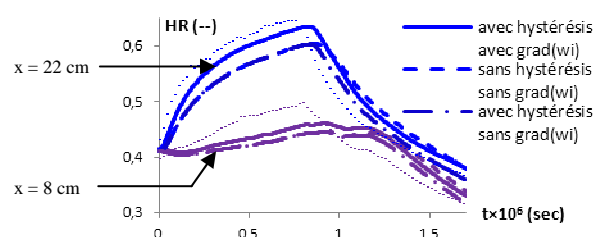
Les différences observées entre les capacités de stockage expérimentales et théoriques sont inhérentes aux valeurs des coefficients du modèle de Van Genuchten  $\alpha$  et  $\eta$  retenues pour modéliser les courbes principales. En effet, la courbe d'adsorption principale modélisée est plus « plane » que la courbe expérimentale ; en conséquence, la capacité de stockage du modèle est plus faible que la capacité de stockage expérimentale. Par ailleurs, le phénomène d'hystérésis diminue clairement la capacité de stockage du matériau. Dans la gamme d'étude d'humidité relative (entre 40 et 80% environ), le modèle d'hystérésis retenu semble à même de reproduire le comportement expérimental du béton de chanvre. En outre, afin de prendre en compte l'histoire hydrique du matériau, un gradient décroissant de teneur en eau initiale a été imposé. Ainsi, la teneur en eau initiale du côté extérieur du mur est proche de la courbe de désorption principale alors que du côté intérieur du mur elle est proche de la courbe d'adsorption principale. L'utilisation de cette modélisation traduit une histoire possible, parmi d'autres, vécue par le matériau. Ce choix de gradient de teneur en eau initiale se justifie notamment par le fait que, sur l'histoire complète vécue par la paroi, la surface intérieure est soumise généralement à des conditions de température et d'humidité pratiquement constantes (23°C/40%) alors que la surface extérieure est soumise à des variations élevées d'humidité relative (jusqu'à 90%) et des fluctuations importantes de température.

#### 4. Application à une paroi monocouche en béton de chanvre

Expérimentalement, avant chaque séquence d'essai proposée dans ce paragraphe, les ambiances intérieures et extérieures sont maintenues aux alentours de 23°C et 40% jusqu'à stabilisation autour de ces valeurs.

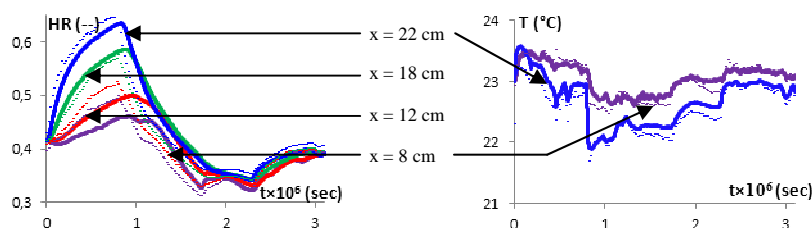
#### 4.1. Cas isotherme soumis à un gradient d'humidité relative

Dans cet exemple, la paroi intérieure est soumise à des conditions pratiquement constantes (23°C/40%) alors que l'ambiance extérieure maintenue aux alentours de 23°C subit d'importantes variations d'humidité relative (de 30 à 85%). L'effet couplé du modèle numérique d'hystérésis et du gradient de teneur en eau initiale  $\nabla w_i$  est clairement mis en évidence sur la figure 3 pour deux positions de capteur à 22 cm et 8 cm de la surface intérieure. Le modèle d'hystérésis permet de mieux prendre en compte les variations d'humidité grâce à la meilleure modélisation de la cinétique de stockage. Le gradient de teneur en eau initiale influe à la fois sur la cinétique de stockage et sur les propriétés hydriques du matériau.



**Figure 3.** Distributions d'humidité relative à 22 cm et 8 cm de la surface intérieure

En outre, le modèle complet fournit des résultats très satisfaisants à la fois en termes de distribution de température et d'humidité relative au sein de la paroi (figure 4). De légères différences subsistent néanmoins entre résultats numériques et expérimentaux dans la distribution d'humidité proche de la surface intérieure.

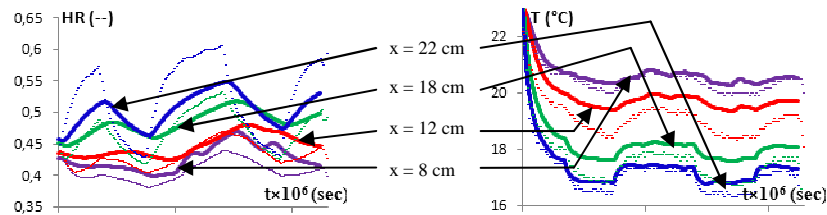


**Figure 4.** Distributions d'humidité relative (à gauche) et de température (à droite) expérimentales et numériques

#### 4.2. Cas non isotherme soumis à un gradient d'humidité

Côté intérieur, les conditions d'humidité relative et de température sont ici aussi maintenues constantes à 40% et 23°C alors que côté extérieur, l'humidité varie de 45 à 75% et la température est fixée à 15°C. Les résultats numériques de distribution de température apparaissent tout à fait corrects (figure 5 à droite). Néanmoins, on observe un certain décalage entre résultats numériques et résultats expérimentaux dans la distribution de l'humidité relative à travers la paroi (figure 5 à gauche). La sensibilité des propriétés thermophysiques à la température et l'étude de phénomènes physiques supplémentaires (condensation de surface, thermodiffusion) ne permettent pas de répondre aux carences de la modélisation. Puisqu'en condition isotherme le modèle développé est performant, il semblerait ainsi a priori que la température joue

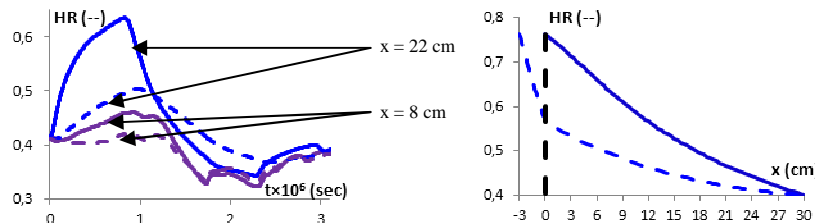
dans ce cas un rôle sur la cinétique de distribution de l'humidité relative. En effet, comme le montre [ROD 2011] pour un béton cellulaire, la diminution de température favorise le stockage de l'humidité au sein du matériau. Pour une humidité relative donnée, la quantité d'eau stockée par le matériau est plus importante à des températures inférieures à la température de référence de 23°C, et, par corrélation, sa cinétique de stockage en est ainsi modifiée.



**Figure 5.** Distributions d'humidité relative (à gauche) et de température (à droite) expérimentales et numériques

### 5. Application à une paroi en béton de chanvre enduite

Dans cet exemple multicouche, l'attention est portée sur l'influence d'une couche d'enduit déposée sur la surface extérieure de la paroi en béton de chanvre. L'enduit choisi pour cette étude est un enduit de type chanvre/chaux d'épaisseur 3 cm dont les propriétés sont issues de [COL 2004]. Les conditions expérimentales choisies ici sont les mêmes que celles du cas isotherme du paragraphe 4.1. La couche d'enduit ne joue pas le rôle de barrière aux transferts d'humidité mais confère plutôt un effet tampon à la paroi [AIT 2012] (figure 6).



**Figure 6.** Distributions d'humidité relative (à gauche) et variation d'humidité relative dans l'épaisseur de la paroi au pic d'HR à  $7,345.10^6$  sec (à droite) sans enduit (traits pleins) et avec enduit (traits pointillés)

### 6. Conclusion et perspectives

Les résultats obtenus en condition isotherme attestent des performances du modèle complet de transferts hygrothermiques présenté. L'intégration d'un modèle d'hystérésis et la prise en compte de l'histoire hydrique du matériau sont des éléments nécessaires pour caractériser le comportement hydrique réel du béton de chanvre. En outre, l'application d'un enduit chanvre/chaux sur la paroi en béton de chanvre, caractéristique d'une construction réelle, met en évidence sa participation

dans l'effet tampon hydrique. Cependant, les différences observées en situation non isotherme entre résultats expérimentaux et simulés montrent que la température a une influence sur le stockage et la cinétique de stockage du matériau. A ce titre, il semble intéressant d'évaluer expérimentalement les cinétiques de stockage du béton de chanvre à des températures différentes de la température de référence à 23°C et d'intégrer la thermodépendance cinétique au modèle d'hystérésis. A terme, les performances hygrothermiques du béton de chanvre peuvent être comparées à celles d'autres matériaux (béton cellulaire, autres éco-matériaux...) quelles que soient les conditions de température et d'humidité.

## 7. Bibliographie

- [AIT 2011] Aït Ouméziane Y., Bart M., Moissette S., Lanos C., « Modélisation du transfert d'air, de masse et de chaleur aux travers de parois multicouches », *Actes du X<sup>ème</sup> Colloque Interuniversitaire Franco-Québécois (CIFQ 2011)*, Chicoutimi, Canada, 20-22 juin 2011
- [AIT 2012] Aït Ouméziane Y., Moissette S., Bart M., Lanos C., "Effect of coating on the hygric performance of a hemp concrete wall", *Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Building Physics Conference IBPC 2012*, Kyoto, Japon, 28-31 mai 2012
- [COL 2004] Collet F. Caractérisation hydrique et thermique de matériaux de génie civil à faibles impacts environnementaux, thèse de doctorat, Université de Rennes 1, 2004
- [EVR 2008] Evrard A., Transient hygrothermal behaviour of Lime-Hemp Materials, thèse de doctorat, Université Catholique de Louvain, Belgique, 2008
- [HAG 2004] Hagentoft C.E. et al., "Assessment Method for Numerical Prediction Models for Combined Heat, Air and Moisture Transfer in Building Components: Benchmarks for One-dimensional Cases", *Journal of Thermal Envelope and Building Science* 27(4), 2004, p. 327-352.
- [HUA 2005] Huang H-C., Tan Y-C., Liu C-W, Chen C-H, "A novel hysteresis model in unsaturated soil", *Hydrological Processes*, vol. 19, issue 8, 2005, p. 1653-1665.
- [KUN 1995] Kunzel H. M., "Simultaneous heat and moisture transport in building components", Fraunhofer IRB Verlag Stuttgart, Allemagne, 1995
- [ROD 2011] Rode C., Hansen K.K., "Hysteresis and temperature dependency of moisture sorption – new measurements", *Proceedings of the 9<sup>th</sup> Nordic Symposium on Building Physics NSB 2011*, Tampere, Finland, 29 mai-2 juin 2011
- [SAM 2008] Samri D., « Analyse physique et caractérisation hygrothermique des matériaux de construction: approche expérimentale et modélisation numérique », Thèse de doctorat, Institut National Sciences Appliquées de Lyon, 2008
- [TAR 2010] Tariku F., Kumaran K., Fazio P., "Transient model for coupled heat, air and moisture transfer through multilayered porous media", *International Journal of Heat and Mass Transfer* 53, 2010, p 3035-3044
- [VAN 2010] Van Belleghem M. et al. "Sensitivity analysis of CFD coupled non-isothermal heat and moisture modelling", *Building and Environment* 45, 2010, p. 2485-2496
- [VAN 1980] Van Genuchten M.Th., "A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils", *Soil Sci. Soc. Am. Journal* 44, 1980, p 892-898